

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international

PCT

(43) Date de la publication internationale  
31 décembre 2003 (31.12.2003)(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/001399 A1(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :  
G01N 21/21, G01J 4/00, G01B 11/00F-75794 Paris Cedex 16 (FR). UNIVERSITE PIERRE  
ET MARIE CURIE [FR/FR]; 4, place Jussieu, F-75005  
Paris (FR).(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2003/001895

(72) Inventeurs; et

(22) Date de dépôt international : 19 juin 2003 (19.06.2003)

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : AUSSERE,  
Dominique [FR/FR]; Les Ardriers, F-72370 Soulitré (FR).  
VALIGNAT, Marie-Pierre [FR/FR]; 246 Valley Road,  
F-08540 Princeton, New-Jersey (FR).

(25) Langue de dépôt : } français

(74) Mandataires : MICHELET, Alain etc.; Cabinet Harle et

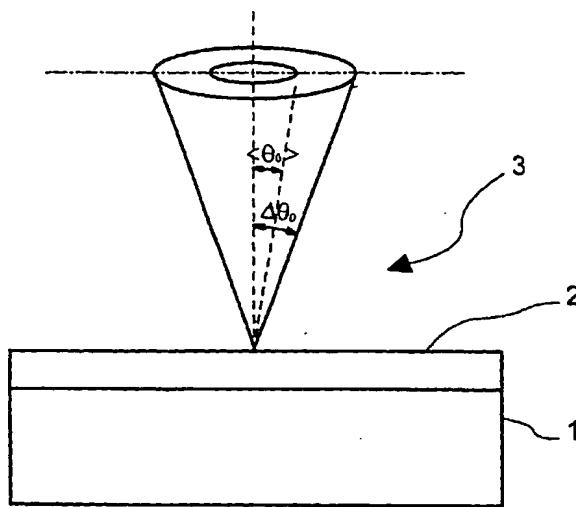
(26) Langue de publication : français

Philip, 7, rue de Madrid, F-75008 Paris (FR).

(30) Données relatives à la priorité :  
02/07599 19 juin 2002 (19.06.2002) FR(81) États désignés (*national*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,  
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK,(71) Déposants (*pour tous les États désignés sauf US*) :  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) [FR/FR]; 3, rue Michel-Ange,*[Suite sur la page suivante]*

(54) Title: ANTIGLARE SUPPORTS AND CONTRAST AMPLIFYING SUPPORTS FOR REFLECTED POLARIZED LIGHT

(54) Titre : SUPPORTS ANTI-REFLECHISSANTS ET SUPPORTS AMPLIFICATEURS DE CONTRASTE POUR LA LUMIERE POLARISEE EN REFLEXION



$$\frac{d^2}{de_1^2} \ln |\sigma|^2 = 0 \quad (I)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})} \quad (II)$$

**(57) Abstract:** The invention concerns a support designed for observing between intersecting polarizers an object located in its vicinity in a medium (3) of index  $n_0$  with incident convergent incoherent illumination under an angle  $\theta_0$  at a wavelength  $\lambda$ . Said support comprises a substrate (1) with complex refractive index  $n_2$  and a layer (2) of refractive index  $n_1$  and thickness  $e_1$ . According to the invention, the value of the thickness  $e_1$  of the layer (2) is at  $\pm 2\%$  such that  $\frac{d^2}{de_1^2} \ln |\sigma|^2 = 0$  with  $\sigma = \sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)} + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)}(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})$ . The invention also concerns observation devices incorporating such a support.

**(57) Abrégé :** L'invention concerne un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé à son voisinage dans un milieu (3) d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ . Ledit support comprend un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$  et une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ . Selon l'invention, la valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) est à  $\pm 2\%$  près telle que (I) avec (II). L'invention concerne aussi des dispositifs d'observation incorporant un tel support.

WO 2004/001399 A1



LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,  
MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG,  
SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,  
VN, YU, ZA, ZM, ZW.

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

(84) États désignés (*regional*) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

## SUPPORTS ANTI-REFLECHISSANTS ET SUPPORTS AMPLIFICATEURS DE CONTRASTE POUR LA LUMIERE POLARISEE EN REFLEXION

La présente invention concerne des supports porte-objet destinés à améliorer les mesures ou l'observation en réflexion de films minces ou d'objets très petits sous microscope optique ou sous tout autre instrument d'imagerie optique: viseur, lunette, macroscope, loupe, loupe binoculaire, 5 caméra, appareil photo, microscope à champ proche, endoscope, microscope confocal, microscope à champ proche optique (SNOM), lecteur de biopuces, lecteur magnéto-optique, microscope confocal. Ces supports sont en particulier destinés à être utilisés dans les techniques de visualisation et de mesure en contraste interférentiel différentiel (DIC) par réflexion. Ils sont 10 également destinés à être utilisés dans toutes les techniques d'observation et de mesure par réflexion en lumière polarisée.

Ces supports sont définis soit par un ensemble de caractéristiques qui peuvent concerner leur nature (exemple: une couche diélectrique sur un substrat de silicium) ou leur fonction (exemple: support amplificateur de 15 contraste pour les observations entre polariseurs croisés), et qui si elles sont communes à un certain nombre de ces supports les classent dans des familles de supports, soit par un ensemble de paramètres ajustables qui permettent de reconnaître individuellement les membres d'une famille donnée.

20 L'objectif de la présente invention est donc de proposer un support, présentant en fonction de l'épaisseur  $e_1$  et de l'indice  $n_1$  de la couche formée sur un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ , dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$ , soit une fonction amplificatrice de contraste pour une observation en lumière polarisée, soit une fonction anti-réfléchissante pour la lumière 25 polarisée.

A cet effet, l'invention concerne un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé sur le support ou à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage spatialement incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

30 - un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,  
- une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ .  
La valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche est à 2% près telle que :

$$\frac{d^2}{de_1^2} \ln |\sigma|^2 = 0$$

avec

$$\sigma = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})}$$

5 formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)]:

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$10 \quad r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ ,

$$\text{avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

15 L'invention concerne également un support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé sur le support ou à son voisinage dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,

20 une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ .

La valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche est à 2% près telle que :

$$\frac{d}{de_1} |\sigma^2| = 0$$

avec

$$25 \quad \sigma = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)]:

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

5 et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ ,

$$\text{avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

10

L'invention concerne également un support destiné à l'optimisation du coefficient d'extinction utile d'un microscope polarisant pour l'observation d'un objet placé sur le support ou au-dessus du support dans un milieu d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une 15 longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$ .

La valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche est à 2% près telle que :

20

$$\frac{d}{de_1} \left( \frac{|\sigma|^2}{R_{NP}} \right) = 0$$

avec

$$R_{NP} = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$$

et

$$r_p = \frac{r_{01(p)} + r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)}}{1 + r_{01(p)} r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)}} \quad \text{et} \quad r_s = \frac{r_{01(s)} + r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)}}{1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)}}$$

25 et

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01} \pi_{12} e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)}) (1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)})}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)]:

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

5 et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ , avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

10 La présente invention concerne également les caractéristiques qui ressortiront au cours de la description qui va suivre et qui devront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniques possibles :

15 - les valeurs de l'indice de réfraction  $n_1$  et de l'épaisseur  $e_1$  de la couche sont à 2% près tels que :

$$\sigma = 0$$

20 - le substrat et la couche sont diélectriques ou faiblement absorbants, le module de la partie imaginaire de leur indice complexe étant inférieur à 0.01, les conditions générales se réduisant aux conditions :

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

et

$$25 n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0}$$

avec  $k$  entier et avec une incertitude de 2 % sur les valeurs de  $n_1$  et  $e_1$  ;

-  $\theta_0$  est inférieur à 5°, les conditions générales se réduisant à

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2}$$

et

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

avec  $k$  entier et avec une incertitude de 2 % sur les valeurs de  $n_1$  et  $e_1$  ;

5

- le support est destiné à un usage en éclairage incident annulaire avec un angle d'incidence  $\theta_0$  qui est unique à  $\pm 2.5^\circ$  près ;

10 - le support est destiné à un usage en éclairage incident et axial convergent avec un angle d'incidence moyen  $\theta_0$  lié à son ouverture angulaire totale  $\Delta\theta_0$  par la relation :

$$\cos \theta_0 = \cos^2 \left( \frac{\Delta\theta_0}{2} \right)$$

- l'éclairage est monochromatique ou quasi-monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$  ;

15

- l'éclairage est à spectre large continu ou polychromatique d'étendue maximale  $\pm 0.3 \lambda$  autour de sa longueur d'onde moyenne  $\lambda$  ;

20 - le support étant destiné à un usage dans l'air comme milieu ambiant, avec  $\theta_0 = 30^\circ$  et  $\lambda = 589,3$  nm, le substrat est en cadmium avec  $n_2 = 1.13 - 5.01j$ , la couche ayant pour indice  $n_1 = 1.42$  et  $e_1 = 1084$  Angströms ;

25 - le substrat et la couche ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat, pour l'air comme milieu ambiant,  $\theta_0 = 5^\circ$  et  $\lambda = 540$  nm

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
or	$0.40 - 2.6j$	1.70	694
argent	$0.13 - 3.44j$	1.59	795
aluminium	$0.92 - 0.95j$	2.01	346
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.51	847

-  $\theta_0$  est un angle d'incidence moyen valant  $20^\circ$  et le substrat et la couche ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat,  
 5 pour l'air comme milieu ambiant (3) et  $\lambda = 540 \text{ nm}$

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
Or	$0.40 - 2.6j$	1.64	739
Argent	$0.13 - 3.44j$	1.55	838
aluminium	$0.92 - 0.95j$	1.89	399
Nickel	$1.76 - 3.2j$	1.48	890

-  $\theta_0$  vaut  $5^\circ$  et le substrat et la couche ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche à 2% près,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du substrat,  $n_0$  l'indice du milieu ambiant,  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$  quand la couche est en cadmium et  $\lambda = 540 \text{ nm}$  dans les autres cas  
 10

substrat	$n_2$	$n_0$	$n_1$	$e_1$
or	$0.40 - 2.6j$	1.33	2.42	490
or	$0.40 - 2.6j$	1.5	1.79	755
argent	$0.13 - 3.44j$	1.33	2.28	512
argent	$0.13 - 3.44j$	1.5	2.7	412
aluminium	$0.92 - 0.95j$	1	1.89	399
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.33	2.11	572
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.5	2.45	473
cadmium	$1.13-5.01j$	1	1.49	970
cadmium	$1.13-5.01j$	1.33	2.05	684
cadmium	$1.13-5.01j$	1.5	2.36	582
étain	$1.48-5.25j$	1	1.48	899
étain	$1.48-5.25j$	1.33	2.02	640
étain	$1.48-5.25j$	1.5	2.33	548
cuivre	$1.04-2.59j$	1	1.62	746
cuivre	$1.04-2.59j$	1.33	2.23	423
cuivre	$1.04-2.59j$	1.5	2.83	351

Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1	1.54	737
	1.51-1.63j	1.33	2.23	423
	1.51-1.63j	1.5	2.72	305

- les paramètres définis par les revendications 10 à 14 sont conservés à l'exception de la longueur d'onde  $\lambda$  et de l'épaisseur  $e_1$  de la couche 2 qui sont modifiés proportionnellement,  $\frac{e_1}{\lambda}$  n'étant pas modifié.

5

L'invention concerne également un accessoire destiné à l'observation d'un échantillon préférentiellement liquide constitué d'une boîte de Petri et d'un support destiné à recevoir ledit échantillon, le support étant le fond de cette boîte.

10

L'invention concerne également les dispositifs ayant les caractéristiques suivantes :

- dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un support destiné à recevoir ledit échantillon et deux polariseurs croisés ;
- dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un accessoire destiné à recevoir ledit échantillon et deux polariseurs croisés ;
- dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un support destiné à recevoir ledit échantillon, un polariseur et une lame quart-d'onde ;
- dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un accessoire destiné à recevoir ledit échantillon, un polariseur et une lame quart-d'onde ;
- 25 - dispositif d'observation d'un échantillon dont le microscope optique est muni d'un dispositif de contraste interférentiel différentiel.

Dans différents modes de réalisation possibles, l'invention sera décrite plus en détail en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique de la transmission et de la réflexion obliques d'une onde plane à l'interface plane entre deux milieux semi-infinis 0 et 1 ;
- la figure 2 est une représentation schématique d'un support, selon  
5 l'invention.

Pour décrire complètement l'invention, le support qu'elle concerne est présenté, ci-après, dans son contexte en reprenant à la fois les définitions des éléments impliqués et des dispositifs proches par rapport auxquels il est utile de le situer.  
10

#### I. Conventions:

Les conventions de signe adoptées sont celles représentées à la figure 1 et décrites également dans le livre de Azzam et Bashara intitulé "ellipsometry and polarised light", North-Holland, p 271.

15 Cette figure représente la transmission et la réflexion obliques d'une onde plane à l'interface plan entre deux milieux semi-infinis 0 et 1.  $\theta_0$  et  $\theta_1$  sont respectivement les angles d'incidence et de réfraction.  $p$  et  $s$  sont respectivement les polarisations parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence. Le vecteur produit  $\hat{p} \times \hat{s}$  des vecteurs unités le long de ces axes  
20 est parallèle à la direction de propagation et orienté dans le sens de la propagation.

#### II. Définitions:

- Par "support", on entend l'association d'un substrat 1 solide d'indice complexe de réfraction  $n_2$  et d'un revêtement comportant au moins une couche 2 d'épaisseur  $e_1$  et d'indice de réfraction complexe  $n_1$ . Ce support est placé dans un milieu ambiant 3 d'indice  $n_0$ .
- Par "échantillon", on entend l'association du support porte-objet et de l'objet qu'il porte, ledit support étant l'objet de l'invention.
- Par "observation", on entend une observation oculaire directe à travers un instrument ou l'acquisition d'une image ou d'un signal par des moyens de détection comprenant un dispositif d'enregistrement tel qu'appareil photo analogique ou numérique, caméra CCD, ou un dispositif de mesure tel qu'un détecteur (cellule photovoltaïque, photomultiplicateur) ou une matrice de détecteurs (barrette de photodiodes, CCD, ....) placés dans un plan où  
30 se forme l'image de l'échantillon.
- Par "échantillon", on entend l'association du support porte-objet et de l'objet qu'il porte, ledit support étant l'objet de l'invention.
- Par "observation", on entend une observation oculaire directe à travers un instrument ou l'acquisition d'une image ou d'un signal par des moyens de détection comprenant un dispositif d'enregistrement tel qu'appareil photo analogique ou numérique, caméra CCD, ou un dispositif de mesure tel qu'un détecteur (cellule photovoltaïque, photomultiplicateur) ou une matrice de détecteurs (barrette de photodiodes, CCD, ....) placés dans un plan où  
35 se forme l'image de l'échantillon.

- Un support parfaitement réfléchissant est défini par les relations

$$|r_p| = |r_s| = 1 \quad (\text{E1})$$

sur ses coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$ .

- "L'intensité normalisée" de l'image d'un support ou d'un échantillon obtenue au moyen d'un dispositif d'imagerie fonctionnant en réflexion et incluant éventuellement un ou plusieurs éléments polarisants et/ou modifiant la polarisation de la lumière et recueillie par des moyens de détection ou d'observation est définie par le rapport  $R = \frac{I}{I_0}$  où  $I = I(x, y)$  désigne

l'intensité recueillie en un point  $(x, y)$  de l'image et où  $I_0 = I_0(x, y)$  désigne l'intensité recueillie en un point  $(x, y)$  de l'image par les mêmes moyens de détection ou d'observation réglés de la même façon en l'absence de tout polariseur et en utilisant un support parfaitement réfléchissant.

- Un support "anti-réfléchissant" (AR) est défini comme ayant un coefficient de réflexion minimal sur l'ensemble de ses paramètres ajustables. Il est relatif aux conditions de l'observation ou de la mesure. Un support anti-réfléchissant idéal est tel que son coefficient de réflexion soit nul.
- Un support "amplificateur de contraste" est défini tel que l'objet qu'il porte soit observé avec un contraste rendu maximal ou qu'une grandeur physique de l'objet soit mesurée avec une sensibilité rendue maximale sur l'ensemble de ses paramètres ajustables. Il est également relatif aux conditions de l'observation ou de la mesure. Il est de plus relatif à la nature de l'objet observé. Lorsque la nature de l'objet n'est pas précisée, l'objet sera défini par défaut comme un film mince d'épaisseur 1 Angström ( $\text{\AA}$ ) et d'indice  $n$  identique à celui de la surface du support, c'est à dire du matériau constituant la couche 2 en contact avec l'objet.

### III. Conditions d'éclairage:

"L'éclairage axial convergent" est convergent et à symétrie radiale autour de la normale à la surface, défini comme "l'axe" dans la suite de la description, avec un angle d'ouverture  $\theta_{max}$ . Les angles d'incidence participant au cône d'éclairage sont donc tous les angles compris entre 0 et  $\theta_{max}$ .

« L'éclairage annulaire » possède aussi une symétrie radiale autour de la normale à la surface, i.e. l'axe, mais il est défini par un angle d'incidence  $\theta$  unique à mieux que 5 degrés près. L'éclairage "anisotrope" est défini par le fait que la symétrie radiale des azimuts  $\varphi$  est brisée mais la symétrie par

rapport à l'axe conservée, et enfin "l'éclairage oblique" est défini par un seul angle d'incidence  $\theta$  et un seul azimut  $\varphi$ .

Excepté lorsque spécifié, l'éclairage sera considéré comme annulaire dans le reste de la description. Cependant, les supports décrits pour un usage 5 sous éclairage annulaire avec un angle d'incidence  $\theta_0$  sont également destinés à être utilisés avec un éclairage axial convergent avec un angle d'incidence moyen  $\theta_0$ .

Lorsque l'éclairage est axial convergent, on appelle "angle moyen"  $\theta_0$  10 l'angle défini par le cercle séparant le cône d'éclairage en deux angles solides de même valeur. Le support est donc destiné à être utilisé sous un éclairage convergent d'ouverture angulaire  $\Delta\theta_0$  et centré sur  $\theta_0$ , où  $\theta_0$  est l'angle d'incidence moyen compris entre 0 et  $\Delta\theta_0$  défini par la relation  $\cos\theta_0 = \cos^2\left(\frac{\Delta\theta_0}{2}\right)$  (Figure 2).

Par défaut, la collection de la lumière par les moyens de détection ou 15 d'observation est supposée à symétrie radiale autour de la normale à la surface, avec le même angle unique de collection ou le même angle d'ouverture que l'éclairage, dans le reste de la description.

L'éclairage est spatialement incohérent, ce qui signifie qu'un rayon lumineux contribuant à l'éclairage ne peut interférer qu'avec lui-même. Dans ces 20 conditions, les contributions à la formation de l'image doivent être ajoutées en amplitude le long d'un faisceau et en intensité sur l'ensemble des faisceaux, c'est à dire sur l'ensemble des angles d'incidence  $\theta$  et des azimuts  $\varphi$  contribuant à l'éclairage. Les coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$  sont des fonctions complexes de  $\theta$ . Dans le cas de supports anisotropes, ce sont de plus des 25 fonctions de  $\varphi$ . Mais le support est supposé isotrope dans le reste de la description excepté lorsque spécifié.

De même, l'éclairage est supposé monochromatique ou quasi-monochromatique, le faisceau lumineux étant centré sur une longueur d'onde  $\lambda$ . Cependant, les supports décrits pour un usage sous éclairage quasi-monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$  sont également destinés à être 30 utilisés avec un éclairage en lumière blanche ou poly-chromatique, le spectre de l'éclairage étant alors centré sur  $\lambda$ .

#### IV. Conditions de polarisation

##### IV.1) Lumière non polarisée:

L'intensité normalisée  $R_{NP}$  s'écrit:

$$R_{NP} = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) \quad (\text{E2})$$

Elle vaut 1 pour un support parfaitement réfléchissant.

Le coefficient de réflexion du support est défini par cette intensité normalisée

5 en lumière non polarisée. Il dépend des conditions d'éclairage.

#### IV.2) Lumière polarisée:

L'échantillon est placé entre un premier et un deuxième polariseurs. Dans un mode de réalisation préférentielle et pour le reste de la description lesdits polariseurs seront considérés comme linéaires. Lorsque ledit 10 échantillon est éclairé par un faisceau lumineux, le faisceau traverse sur son trajet optique le premier polariseur qui définit sa polarisation, puis après interaction avec l'échantillon, le faisceau lumineux traverse le deuxième polariseur. Le premier polariseur est appelé "polariseur d'éclairage". Le deuxième polariseur est le polariseur d'analyse ou "analyseur". Le premier et 15 le deuxième polariseurs forment entre eux un angle  $\phi$  modulo  $\pi$ .

L'intensité normalisée  $R(\phi)$  s'écrit :

$$4 R(\phi) = \cos^2 \phi (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (\text{E3})$$

ou, de façon équivalente :

$$20 \quad 4 R(\phi) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) + \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} + \frac{\cos 2\phi}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (\text{E4})$$

Dans le cas particulier où le premier et deuxième polariseurs sont parallèles, elle s'écrit :

$$4 R(0) = (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 = 2R_{NP} - \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (\text{E5})$$

25

ou, de façon équivalente :

$$4 R(0) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (\text{E6})$$

Dans le cas particulier où les premier et deuxième polariseurs sont 30 perpendiculaires, c'est à dire croisés, elle s'écrit :

$$4 R(\frac{\pi}{2}) = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 \quad (\text{E7})$$

ou, de façon équivalente:

$$4 R\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) - \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 = R_{NP} - \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2 \quad (\text{E8})$$

Dans le cas particulier où les deux polariseurs font entre eux un angle  $\frac{\pi}{4}$ ,  
5 elle s'écrit:

$$4 R\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2} (|r_p|^2 + |r_s|^2) = R_{NP} \quad (\text{E9})$$

Ainsi, l'intensité normalisée peut être modulée autour de sa valeur moyenne  $R_{NP}/4$  avec une amplitude  $\frac{1}{16} |r_p - r_s|^2$  par rotation relative de  
10 l'analyseur et du polariseur d'éclairage.

Si on pose  $R^+ = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2$  et  $R^- = \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$ .

Alors:

$$4R(\phi) = 2R_{NP}\cos2\phi - R^+\cos2\phi = R_{NP} + R^-\cos2\phi = R^+ + 2R^-\cos2\phi \quad (\text{E3-E4 bis})$$

15  $4R(0) = 2R_{NP} - R^+ = R_{NP} + R^- \quad (\text{E5-E6 bis})$

$$4 R\left(\frac{\pi}{2}\right) = R^+ = R_{NP} - R^- \quad (\text{E7-E8 bis})$$

Le support de l'invention est destiné à être utilisé entre un premier et un  
20 deuxième polariseurs croisés. Le faisceau lumineux incident sur le support est donc polarisé.

#### V. Supports et revêtements anti-réfléchissants

##### V.1) lumière non polarisée.

Il est connu qu'en lumière non polarisée, un support anti-réfléchissant (AR) placé dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$  présente un coefficient  $R_{NP}$  qui est minimum. Le support anti-réfléchissant idéal, qui vérifie  $R_{NP} = 0$  ne peut être obtenu que pour un seul angle d'incidence  $\theta_0 = 0$  et ne peut être réalisé sur un substrat 1 d'indice  $n_2$  différent de  $n_0$  où  $n_2$  est l'indice de réfraction complexe du substrat 1, qu'en déposant une seule couche 2 d'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  et d'indice optique  $n_1$  tel que:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (\text{E10})$$

$n_0$  étant l'indice optique du milieu incident.

L'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  signifie que l'épaisseur physique  $e_1$  de la couche 2 est liée à la longueur d'onde  $\lambda$  du faisceau lumineux permettant l'éclairage et 5 à la direction  $\theta_1$  dudit faisceau par rapport à la normale à la surface après réfraction dans la couche 2, ou angle d'incidence réfracté, par la relation:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E11})$$

avec  $k$  entier et  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

10 Dans le cas considéré, cette relation se réduit donc à:

$$n_1 e_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E11 bis})$$

Rappelons que l'angle réfracté  $\theta_1$  est lié à l'angle incident  $\theta_0$  sur le support par la relation de Snell:  $n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0$  où  $n_0$  est l'indice optique du milieu 15 incident. De même, nous avons  $n_2 \sin \theta_2 = n_0 \sin \theta_0$ . Rappelons enfin que  $\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 = 1$  dans tous les milieux.

En pratique, il est souvent préférable d'utiliser des supports AR non idéaux mais peu sensibles à la longueur d'onde  $\lambda$  ou à l'angle d'incidence  $\theta_0$  20 du faisceau lumineux incident. Ces supports sont obtenus par des empilements multicouches appelés traitements anti-reflets. Dans un mode de réalisation, ces traitements sont utilisés pour éliminer les reflets sur les verres de lunettes ou pour éliminer la lumière parasite générée par les réflexions sur les dioptrès des systèmes optiques.

25 Il existe cependant d'autres cas où les supports AR plus sélectifs et plus efficaces sont recherchés, par exemple pour l'élaboration de filtres interférentiels passe-bande étroits en transmission.

## V.2) supports et revêtements "AR-Pol" en lumière polarisée.

30 L'invention concerne des supports similaires aux supports anti-réfléchissants, mais destinés à être utilisés en lumière polarisée. Ils se différencient des supports anti-réfléchissants par leur composition et par leurs propriétés optiques. Nous les désignons par l'appellation "AR-Pol".

Ces nouveaux supports forment un ensemble encore plus vaste et plus diversifié que les supports anti-réfléchissants classiques, et peuvent intervenir comme accessoires ou comme composants dans de nombreux procédés ou dispositifs. Cet ensemble est le premier objet de la présente invention. Il se subdivise en familles correspondant à des regroupements par nature ou par fonction dont nous donnons ici quelques exemples. Chaque famille est désignée par une appellation "AR-( )-Pol-( )( )... ", où les parenthèses successives représentent les précisions supplémentaires permettant de la définir.

10 Des équations E2 à E9 découlent les relations d'ordre suivantes:

$$R\left(\frac{\pi}{2}\right) \leq R(\phi) \quad (\text{I1})$$

pour tout  $\phi$ , et:

$$4 R\left(\frac{\pi}{2}\right) \leq 4 R\left(\frac{\pi}{4}\right) = R_{NP} \leq 4 R(0) \quad (\text{I2})$$

15

Ainsi que le montrent les inégalités I1 et I2, l'intensité normalisée de l'image d'un support ou d'un échantillon isotrope est toujours plus faible entre deux polariseurs croisés que pour toute autre orientation relative des polariseurs et qu'en l'absence de polariseur.

20 **V.3) Microscope polarisant:**

Comme il est bien connu, le coefficient d'extinction  $C_e$  d'un microscope polarisant, est l'une de ses caractéristiques techniques importantes. Il doit être aussi faible que possible. Dans le cas d'un microscope fonctionnant en réflexion, il est défini comme le rapport des intensités réfléchies par un support parfaitement réfléchissant placé d'une part entre un premier et un deuxième polariseurs croisés et d'autre part, entre un premier et un deuxième polariseurs parallèles, soit:

$$C_e = \frac{I_o\left(\frac{\pi}{2}\right)}{I_o(0)} \quad (\text{E14})$$

30 L'examen des équations E5 et E7 montre que la définition du support parfaitement réfléchissant donnée par les équations E1 n'est pas suffisante car l'intensité recueillie  $I(\phi)$  dépend des phases relatives des deux coefficients de Fresnel  $r_p$  et  $r_s$  à travers leur somme. Comme le but du coefficient

d'extinction est de caractériser le microscope lui-même, il est nécessaire d'introduire davantage de précision dans la définition du support parfaitement réfléchissant en considérant soit la condition virtuelle  $r_p = r_s = 1$ , soit la condition  $r_p = -r_s = 1$ . La première condition n'étant pas physiquement réaliste, 5 elle est donc éliminée pour ne retenir que la seconde. De plus, on a toujours  $r_p = -r_s$  pour un angle d'incidence du faisceau lumineux sur le support tel que  $\theta_0 = 0$ , ce qui permet d'associer le coefficient  $C_e = 0$  au microscope idéal. Nous définissons le *Coefficient d'extinction* utile de l'ensemble formé par le microscope et l'échantillon comme le rapport:

$$10 \quad C_u = \frac{I(\pi/2)}{I(0)} \quad (\text{E15})$$

l'échantillon étant au minimum constitué d'un support.

Pour un microscope polarisant fonctionnant en réflexion, la valeur de  $C_u$  découle directement des équations E6 et E8:

$$C_u = \frac{R_{NP} - \frac{1}{4}|r_p - r_s|^2}{R_{NP} + \frac{1}{4}|r_p - r_s|^2} = \frac{R_{NP} - R^-}{R_{NP} + R^+} \quad (\text{E16})$$

15

qui s'écrit encore:

$$C_u = \frac{\frac{1}{4}|r_p + r_s|^2}{2R_{NP} - \frac{1}{4}|r_p + r_s|^2} = \frac{R^+}{R_{NP} - R^+} \quad (\text{E16 bis}),$$

puisque:

$$R_{NP} = \frac{1}{4}|r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4}|r_p - r_s|^2 = R^+ + R^- \quad (\text{E16 ter})$$

20

Maximisation du coefficient d'extinction:

Le support anti-réfléchissant idéal correspond à  $R_{NP} = 0$ . D'après l'équation E2, cela implique à la fois  $r_p = 0$  et  $r_s = 0$ , et donc  $R(\phi) = 0$  quel que soit  $\phi$ . Le coefficient d'extinction utile n'est plus défini. On peut alors par prolongement le définir comme:

$$25 \quad C_u = \lim_{R_{NP} \rightarrow 0} C_u \quad (\text{E17}),$$

ce qui permet d'englober le cas limite du support anti-réfléchissant idéal dans la discussion qui suit.

D'après l'équation E16 bis, le coefficient d'extinction utile  $C_u$  est une fonction croissante du rapport  $\frac{|r_p + r_s|^2}{R_{NP}}$ . Pour améliorer le coefficient d'extinction, et donc l'abaisser, c'est ce rapport qu'il faut minimiser.

#### **VI. supports anti-réfléchissants entre polariseurs croisés AR-X-Pol**

5 Nous définissons la famille des supports AR-X-Pol comme la famille des supports pour lesquels le rapport  $\frac{|r_p + r_s|^2}{R_{NP}}$  est rendu minimal, ce qui représente une règle de conception dudit support. De façon équivalente, nous en donnons la définition fonctionnelle suivante: c'est la famille des supports qui optimisent le coefficient d'extinction utile de l'ensemble [microscope + support] pour un microscope polarisant idéal.

10 Les supports AR-X-Pol idéaux s'obtiennent lorsque ce minimum est nul. Ils sont donc donnés par la condition  $\sigma = 0$ .

Nous définissons le revêtement AR-X-Pol comme la couche 2 qui permet de transformer un substrat 1 donné en un support AR-X-Pol.

15 **VI.1) supports AR-X-Pol-SD-1D**

Ces supports correspondent au cas où les matériaux utilisés pour le substrat 1 et la couche 2 sont non absorbants, ce qui signifie que le module de la partie imaginaire de leur indice est inférieur à 0,01.

20 L'expression de  $r_p$  et  $r_s$  pour un solide d'indice optique  $n_2$  recouvert d'une seule couche 2 d'indice  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$  dans un milieu ambiant d'indice  $n_0$  est classiquement donnée par :

$$r_m = \frac{r_{01(m)} + r_{12(m)} e^{(-2j\beta_1)}}{1 + r_{01(m)} r_{12(m)} e^{(-2j\beta_1)}} \quad (\text{E17})$$

[ Azzam et Bashara, "ellipsometry and polarised light", North-Holland, 1987], avec: soit  $m = s$ , soit  $m = p$ , selon la polarisation considérée et avec:

25

$$\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda} \quad (\text{E18})$$

$$\text{. où } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left( \frac{n_0}{n_1} \right)^2 \sin^2 \theta_0} .$$

Cette équation nous permet d'écrire :

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)})e^{(-2j\beta_1)}(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})} \quad (\text{E19})$$

où  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des  
5 coefficients de Fresnel:

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j} \quad (\text{E20})$$

et

10

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (\text{E21})$$

#### VI.1-1) Les supports AR- X-Pol- SD-1D idéaux

Ces supports sont obtenus lorsque  $\sigma = 0$  (E19 bis)

15 Contrairement à la condition [ $R_{NP} = 0$ ] qui définit les supports antiréfléchissants classiques idéaux, la condition  $\sigma = 0$  est toujours vérifiée en incidence normale. Les cas dans lesquels cette condition est également vérifiée pour un angle d'incidence non nul, seront examinés ci-dessous.

20 Les matériaux considérés étant diélectriques ou quasi-diélectriques,  $r_{ij(p)}$  et  $r_{ij(s)}$  sont réels, et donc  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  sont réels. La situation recherchée correspond donc au cas où  $e^{-2j\beta_1}$  est réel, ce qui entraîne, soit :

$$2\beta_1 = (2k + 1)\pi \quad (\text{E22})$$

soit:

25

$$2\beta_1 = 2k\pi \quad (\text{E23})$$

avec  $k$  entier, c'est à dire soit:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E24})$$

30

soit:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = k \frac{d}{2} \quad (\text{E25})$$

La condition E24 est identique à la condition E11 qui est l'une des  
 5 relations définissant les supports anti-réfléchissants classiques. On a donc  
 $e^{i\beta_1} = \pm 1$ . La recherche des solutions de l'équation (E19 bis) se réduit à la  
 résolution des équations:

$$\sigma_{01}(1 + \pi_{12}) - \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) = 0 \quad (\text{E26})$$

10 et:

$$\sigma_{01}(1 + \pi_{12}) + \sigma_{12}(1 + \pi_{01}) = 0 \quad (\text{E27})$$

On note  $c_k^2 = \cos^2 \theta_k$  et  $s_k^2 = \sin^2 \theta_k$  pour tous les milieux.

15 Rappelons la relation de Snell:  $n_k \sin \theta_k = n_0 \sin \theta_0$   
 Il est facile d'établir:

$$\sigma_{ij} = \frac{2n_i n_j (c_i^2 - c_j^2)}{n_i n_j (c_i^2 + c_j^2) + c_i c_j (n_i^2 + n_j^2)} \quad (\text{E28})$$

20 et:

$$1 + \pi_{ij} = \frac{2n_i n_j (c_i^2 + c_j^2)}{n_i n_j (c_i^2 + c_j^2) + c_i c_j (n_i^2 + n_j^2)} \quad (\text{E29})$$

d'où:

$$\frac{\sigma_{ij}}{1 + \pi_{ij}} = \frac{(c_i^2 - c_j^2)}{(c_i^2 + c_j^2)} \quad (\text{E30})$$

L'équation E26 se réduit ainsi à:

$$25 \quad c_0 c_2 = c_1^2 \quad (\text{E31})$$

qui s'écrit encore:

$$2n_0^2 n_2^2 - n_1^2 (n_0^2 + n_2^2) = (n_0^2 n_2^2 - n_1^4) \sin^2 \theta_1 \quad (\text{E32})$$

Cette équation peut être résolue sans difficulté par rapport à chacun de ses paramètres.

30 Elle n'est jamais satisfaite avec un support anti-réfléchissant classique.

Dans le cas où l'angle d'incidence est très petit, cette condition se réduit à:

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2} \quad (\text{E33})$$

Le couple d'équations E25 et E27 n'a pas de solution pour  $n_0 \neq n_2$ .

5 Les deux formules E24 et E32 (ou de façon équivalente E35 bis) définissent la famille de supports AR-X-Pol-SD-1D idéaux pour un angle d'incidence arbitraire défini indifféremment par sa valeur  $\theta_0$  dans le milieu ambiant (3) ou par sa valeur réfractée  $\theta_1$  dans la couche (2) et également pour un éclairage axial convergent défini par un angle réfracté moyen  $\langle\theta_1\rangle$ .

10 Les deux formules E24 et E33 définissent la sous-famille de supports AR-X-Pol-SD-1D idéaux pour un instrument d'optique avec un éclairage annulaire défini par un angle d'incidence réfracté  $\theta_1$  ou avec un éclairage axial convergent d'ouverture faible et définie par un angle réfracté moyen  $\langle\theta_1\rangle$ .

15 **Propriétés des équations E32 et E33 et conséquences:**

Les 4 variables  $n_0$ ,  $n_2$ ,  $n_1$  et  $\sin\theta_1 = \frac{n_0}{n_1} \sin\theta_0$  ne sont pas indépendantes. Il suffit de considérer les variables réduites  $x = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2$  et  $y = \left(\frac{n_2}{n_0}\right)^2$  pour décrire toutes les situations.

20 L'équation E32 devient alors:

$$x^2(y + c_0^2) - 2xy + ys_0^2 = 0 \quad (\text{E34})$$

dont les solutions sont données par

i) les solutions en  $x$ :

$$x = \frac{y + c_0 \sqrt{y(y - s_0^2)}}{y + c_0^2} \quad (\text{E35})$$

25

que nous pouvons aussi écrire:

$$n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (\text{E35bis})$$

ii) les solutions en  $y$ :

$$y = \frac{c_0^2 x^2}{c_0^2 - (x-1)^2} \quad (\text{E36})$$

iii) les solutions en  $\theta_0$ :

$$c_0^2 = \frac{y(x-1)^2}{y-x^2} = \frac{n_2^2(n_1^2-n_0^2)^2}{n_0^2(n_0^2n_2^2-n_1^4)} \quad (\text{E37})$$

iv) la variation de  $x$  avec l'angle d'incidence  $\theta_0$ :

5

$$\frac{dx}{d\theta_0} = -\sin 2\theta_0 \frac{2y(x-1)(y-x)}{(y-x^2)^2} = -\sin 2\theta_0 \frac{2n_0^2 n_2^2 (n_1^2 - n_0^2)(n_2^2 - n_0^2)}{(n_0^2 n_2^2 - n_1^4)^2} \quad (\text{E38})$$

qui montre que l'indice optimal  $n_1$  de la couche 2 décroît quand l'angle d'incidence augmente.

10 Pour des incidences faibles, l'évolution de  $n_1$  avec  $\theta_0$  est décrite par l'approximation:

$$x \approx \frac{2y}{(1+y)} \left( 1 - \frac{(y-1)^2}{4y(y+1)} \theta_0^2 \right) = \frac{2n_2^2}{(n_0^2 + n_2^2)} \quad (\text{E39})$$

soit:

$$15 \quad n_1^2 \approx \frac{2n_0^2 n_2^2}{(n_0^2 + n_2^2)} - n_0^2 \left( \frac{n_2^2 - n_0^2}{n_2^2 + n_0^2} \right)^2 \frac{\theta_0^2}{2} \quad (\text{E40})$$

qui montre à nouveau que l'indice optimal décroît quand l'angle d'incidence augmente.

Cette dépendance est d'autant plus faible que  $y$  est proche de 1.

Or, pour un microscope parfait ( $C_e = 0$ ), le coefficient d'extinction utile 20 est toujours nul en incidence normale ( $C_u = 0$ ).

Un support AR-X-POL optimisé pour un angle non nul, par exemple de l'ordre de 20 degrés, est optimal pour travailler avec un éclairage annulaire correspondant. Mais de plus, puisqu'il permet d'obtenir  $C_u = 0$  à la fois pour une incidence nulle et pour une incidence non nulle, il permet de conserver un 25 excellent coefficient d'extinction utile sur l'ensemble du cône d'ouverture d'un éclairage axial convergent, de 0 à 30 degrés par exemple. Cela constitue un avantage considérable des revêtements AR-X-POL sur les revêtements anti-réfléchissants classiques pour toutes les applications des supports anti-réfléchissants compatibles avec l'utilisation d'une lumière polarisée.

Cette flexibilité sur l'angle d'incidence se traduit par une flexibilité analogue sur la longueur d'onde de l'éclairage à faible incidence. En effet, par différenciation logarithmique de l'équation E24 par exemple, nous obtenons:

$$-\tan(\theta_i) \Delta\theta_i = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

5 qui montre qu'une variation de longueur d'onde aussi grande que 30% avec un éclairage annulaire est équivalente à une ouverture de 30 degrés sur un éclairage convergent avec une longueur d'onde fixe. Cette variation de longueur d'onde couvre l'ensemble du spectre visible autour de  $\lambda = 0.55\mu\text{m}$ .

Si l'on veut au contraire exploiter les effets de couleur à des fins de 10 détection, l'utilisation d'un éclairage annulaire avec un angle d'incidence élevé permet d'apporter une grande sensibilité à la longueur d'onde.

Les supports et revêtements AR-X-Pol sont donc particulièrement avantageux pour des utilisations en lumière blanche.

L'indice  $n_1$  de la couche 2 est intermédiaire entre l'indice  $n_2$  du substrat 1 sur 15 lequel elle est formée et l'indice  $n_0$  du milieu ambiant. Les équations E32 et E33 sont symétriques en  $n_0$  et  $n_2$ .

Cela montre que ladite couche 2 possède les mêmes propriétés que la lumière se réfléchisse du milieu de faible indice vers le milieu de fort indice ou du milieu de fort indice vers le milieu de faible indice.

20 Ainsi, on peut éteindre la réflexion d'une lumière polarisée lorsque le substrat 1 est l'extrémité d'une fibre optique, ou bien une lame ou le fond d'une boîte de Petri lorsqu'on les observe par en-dessous sur un microscope inversé.

#### **VI.1-2) supports AR-Pol-X-SD-1D approchés**

25 Lorsque les trois indices ( $n_0$ ,  $n_1$  et  $n_2$ ) sont imposés ou contraints, le minimum de  $|\sigma|$  par rapport à  $e_1$  n'est plus nul si la condition E32 ne se trouve pas vérifiée, mais ce minimum existe néanmoins et correspond à la meilleure extinction possible compte tenu des contraintes.

30 La meilleure extinction possible entre polariseurs croisés s'obtient alors en recherchant le minimum de  $|\sigma|$  (ou de façon équivalente celui de  $|\sigma|^2$ ) par rapport à  $e_1$ . Avec  $\theta_1$  et  $n_1$  fixés, cela revient à les chercher par rapport à  $\beta_1$ .

Posons  $z = e^{-j\beta_1} = \cos 2\beta_1 - j\sin 2\beta_1$ . L'expression de  $\sigma$  donnée par l'équation E19 est le rapport de 2 polynômes de degré 2 en  $z$ . Puisque  $|z| = 1$ , le carré du module de chacun de ces polynômes ne contient que des termes

constants, des termes en  $\cos 2\beta_1$ , et des termes en  $\cos 4\beta_1$ . La dérivée de leur rapport est donc proportionnelle à  $\sin 2\beta_1$ . Les solutions de  $\sin 2\beta_1 = 0$  sont donc des solutions de l'équation  $\frac{d|\sigma|^2}{d\beta_1} = 0$ . On retrouve donc les solutions données par les équations E24 et E25. Ainsi, même lorsque les conditions 5 E32 ou E33 ne sont pas satisfaites, on peut optimiser l'épaisseur de la couche 2 pour optimiser le coefficient d'extinction utile sous un microscope polarisant, et cet optimum correspond soit à une couche 2 "à  $\frac{\lambda}{4}$ ", soit à une couche 2 "à  $\frac{\lambda}{2}$ ".

### **VI.2) supports AR-X-Pol-1**

10 Nous décrivons ici les règles de construction des supports AR-X-Pol constitués d'un substrat 1 solide recouvert d'une seule couche 2 dans le cas général où le support, la couche 2, et le milieu incident 3 ont des indices optiques complexes quelconques (milieux éventuellement absorbants).

#### **VI.2-1) supports AR-X-Pol-1 idéaux**

15 Parmi ceux-ci, les supports idéaux pour l'angle  $\theta_0$  sont obtenus lorsque  $\sigma = 0$ , où la quantité  $\sigma$  est donnée par l'équation E19, où  $\beta_1$  est lié à l'angle  $\theta_1$  par la relation E18,  $\theta_2$ ,  $\theta_1$  et  $\theta_0$  étant toujours liés par la relation de Snell étendue aux fonctions complexes.

L'équation:

20  $\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})z + \sigma_{01}\pi_{12}z^2 = 0 \quad (\text{E19 ter})$   
a toujours 2 solutions  $z_1$  et  $z_2$  ordonnées selon leur module,  $|z_1| < |z_2|$ , qui s'expriment en fonction des coefficients  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\pi_{01}$  et  $\pi_{12}$  eux mêmes fonctions des trois indices  $n_0$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  et de l'angle  $\theta_0$ .

Le milieu 1 n'étant pas amplificateur, la solution  $z_1$  est la seule acceptable. 25 Son expression se traduit par une relation qui définit numériquement la famille des supports AR-X-POL-1 idéaux. Cette famille est bornée par la condition  $|z_1| \leq 1$ .

#### **VI.2-2) supports AR-X-Pol-1 approchés.**

30 Lorsque les trois indices sont imposés ou contraints et que l'un d'entre eux au moins est complexe, le minimum de  $|\sigma|$  par rapport à  $e$ , n'est plus nul si la condition E42 n'est pas vérifiée par la solution de plus petit module de l'équation E19ter, mais il existe néanmoins puisque  $|\sigma|$  est une fonction quasi-

périodique de  $e_1$ . On entend ici par "quasi-périodique" que  $n_1$  étant complexe, le module de  $e^{-4j\beta_1}$  s'amortit quand  $e_1$  augmente.

Le meilleur coefficient d'extinction possible compte tenu des contraintes est obtenu en recherchant le minimum de  $|\sigma|$  (ou de façon équivalente celui de  $|\sigma|^2$ ) par rapport à  $e_1$ . A  $\theta_1$  et  $n_1$  fixés, cela revient à le chercher par rapport à la quantité complexe  $\beta_1$ , ce qui peut être fait numériquement.

L'épaisseur  $e_1$  est ensuite donnée par l'équation:

$$e_1 = \frac{\lambda\beta_1}{2\pi|n_1 \cos\theta_1|} \quad (\text{E43})$$

qui est une généralisation de l'équation E18.

#### 10 VI.2- 3) revêtement diélectrique idéal sur support absorbant.

Un cas particulier utile est celui où seul le support est absorbant, les indices des autres milieux restant réels. Alors  $\beta_1$  est réel, et  $|\sigma|$  est une fonction périodique de  $\beta_1$ .

15 Mais comme  $\sigma_{12}$  et  $\pi_{12}$  sont complexes,  $e^{-2j\beta_1}$  n'est plus réel. L'épaisseur optimale qui annule  $|\sigma|$  est donc donnée par:

$$n_1 e_1 \cos\theta_1 = e_c + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E44})$$

où la plus petite des solutions  $e_c$  n'est plus égale ni à  $\frac{\lambda}{4}$  ni à  $\frac{\lambda}{2}$ .

Cette équation généralise les équations E24 et E25.

Ainsi, dans le cas d'un substrat 1 absorbant, le revêtement AR-X-POL se 20 différencie d'un revêtement anti-réfléchissant classique non seulement par son indice, mais aussi par son épaisseur.

#### VII. Supports amplificateurs de contraste idéaux

Pour la visualisation du bord d'un objet d'étude ayant la forme d'un film mince posé sur la surface du support, il convient d'exploiter d'une part la 25 différence entre les intensités recueillies en observant le film et d'autre part la surface du substrat 1 nue qui sont notées  $I_F$  et  $I_S$  (ou de façon équivalente  $I(F)$  et  $I(S)$ ). Ces intensités sont proportionnelles aux intensités normalisées correspondantes.

Le contraste du bord du film est donné par la relation suivante:

$$30 \quad C_f = \frac{I_F - I_S}{I_F + I_S} \quad (\text{E50})$$

$I_F$  et  $I_S$  étant positifs,  $C_f$  est une fonction strictement croissante du rapport  $\frac{I_F}{I_S}$ .

Pour bien visualiser le film, il faut maximiser  $|C_f|$  et donc rendre le rapport  $\frac{I_F}{I_S}$  maximal ( $I_S \rightarrow 0$ , pour tendre vers un contraste de 1) ou minimal

5 ( $I_F \rightarrow 0$ , pour tendre vers un contraste de -1). Il faut donc éteindre soit la surface, soit le film.

Une méthode de visualisation sensible repose d'une part sur une bonne extinction, et d'autre part sur une extinction critique, c'est à dire très sensible à l'épaisseur de la dernière couche 2 de l'empilement. Les supports  
10 anti-réfléchissants AR-X-Pol présentent ces qualités et sont donc également des supports amplificateurs de contraste.

Les performances d'une méthode de visualisation peuvent être quantifiées par le contraste obtenu lorsque le film observé devient extrêmement mince. Dans ce cas,  $I_F$  et  $I_S$  deviennent voisins et  $dI = I_F - I_S$   
15 s'apparente à un élément différentiel.

Pour un film d'épaisseur très mince  $\Delta e$  posé sur le support, on peut écrire au premier ordre en  $\Delta e$ :

$$\frac{I_F}{I_S} = 1 + \frac{1}{I_S} \frac{dI}{de} \Delta e \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln I \quad (\text{E51})$$

où on a supposé que l'indice optique du film est identique à celui de la couche  
20 2 supérieure, c'est à dire de la dernière couche 2 de l'empilement, et où  $\frac{dI}{de}$  est la dérivée de l'intensité réfléchie par le substrat 1 nu par rapport à l'épaisseur  $e$  de cette couche 2.

Dans le cas où le substrat 1 est composé d'un support solide recouvert d'une seule couche 2 diélectrique,  $e$  est donc l'épaisseur de la couche 2  
25 unique. Le film apparaît donc comme une simple fluctuation d'épaisseur de la couche 2 supérieure.

Un contraste optimal est donc obtenu pour les deux situations:

i)  $\frac{d}{de} \ln I \rightarrow +\infty$  (extinction du support,  $C_f = +1$ )

ii)  $\frac{d}{de} \ln I = -1$  (extinction du film,  $C_f = -1$ )

30 Le contraste optimal ne peut être atteint qu'avec une extinction totale.

La sensibilité de la visualisation est, en  $\text{Angströms}^{-1}$  :

$$\frac{C_f}{\Delta e} = \frac{1}{2} \frac{d \ln I}{de} \quad (\text{E52})$$

Elle n'a de sens que lorsque le contraste est faible (quand  $\frac{d \ln I}{de}$   $\Delta e$  est très petit devant 1) et permet de comparer des seuils de détection.

##### 5 VII.1) en lumière non polarisée

Dans l'équation E51,  $\frac{I_F}{I_S} = \frac{R_{NP}(F)}{R_{NP}(S)} \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln R_{NP}$ .

Puisque l'extinction totale n'est possible qu'avec un support anti-réfléchissant parfait et puisque ce support n'existe que pour une incidence normale, les performances de ce support pour la visualisation en lumière convergente, c'est à dire pour l'imagerie, sont limitées.

##### 10 VII.2) entre polariseur et analyseur croisés

L'équation E51 devient

$$\frac{R_F(\phi)}{R_S(\phi)} \approx 1 + \Delta e \frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 \quad (\text{E52})$$

15 Un contraste optimal est donc obtenu pour les deux situations:

- i)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 \rightarrow +\infty$  (extinction du support,  $C_f = +1$ )
- ii)  $\frac{d}{de} \ln |\sigma|^2 = -1$  (extinction du film,  $C_f = -1$ )

Chacune de ces situations correspond à  $\sigma = 0$  c'est à dire à un support AR-X-Pol idéal. Dans la première, l'épaisseur optimale  $e$  est celle du revêtement seul. Dans la seconde, c'est la somme des épaisseurs du revêtement et de l'objet.

20 La sensibilité de la visualisation est donnée par, en [ $\text{Angströms}^{-1}$ ] :

$$\frac{C_f}{\Delta e} = \frac{d}{de} \ln |r_p + r_s|$$

Il résulte des considérations précédentes que :

- 1) Les meilleurs supports amplificateurs de contraste sont les supports anti-réfléchissants idéaux.

2) Les supports AR-X-Pol sont les seuls supports capables de fournir une extinction totale en éclairage annulaire et une extinction quasi-parfaite en éclairage faiblement convergent. L'utilisation de ces supports entre polariseurs croisés permet d'obtenir des contrastes nettement meilleurs que

5 tous les autres supports dans tous les modes d'imagerie sans marquage en lumière incohérente.

### VIII. supports amplificateurs de contraste non idéaux en lumière polarisée:

#### VIII.1) entre polariseurs croisés

10 Lorsque le support n'est plus idéal, l'équation E19 bis n'est plus satisfaite. C'est en particulier le cas quand l'indice de la couche 2 est imposé et qu'elle n'a plus de solution parce que la relation E26 n'est plus vérifiée. Alors, l'extinction totale n'est plus possible et la condition  $C_f = +1$  ne peut plus être atteinte (la condition  $C_f = -1$  peut encore l'être pour un objet très

15 particulier). Nous montrons que le contraste n'est plus optimisé lorsque le minimum de l'intensité réfléchie est atteint mais pour des épaisseurs de couche 2 situées de part et d'autre de ce minimum, le minimum correspondant à l'inversion de signe du contraste.

Dans ce cas le contraste est optimisé quand:

20 i)  $\frac{d}{de} \ln|\sigma|^2$  maximum (extinction partielle du support,  $C_f$  maximum)

ii)  $\frac{d}{de} \ln|\sigma|^2$  minimum (extinction partielle du film,  $C_f$  minimum)

C'est à dire quand :

$$\frac{d^2}{de^2} \ln|\sigma|^2 = 0 \quad (\text{E57})$$

Nous nous limitons maintenant au cas de matériaux diélectriques et nous cherchons l'épaisseur optimale de la couche 2 diélectrique pour l'optimisation du contraste avec un revêtement amplificateur à une couche 2.

L'épaisseur d'inversion de contraste  $e_1$  est donnée par l'équation E24 qui correspond à la condition que  $e^{-2J\beta_1}$  soit réel. Afin d'explorer les épaisseurs situées de part et d'autre de  $e_1$ , nous posons  $\beta_1 = \frac{\pi}{2} + \varepsilon$ .

30 La relation E26 n'étant plus complètement vérifiée, nous posons :

$$\Delta \equiv \frac{\sigma_{12}(1+\pi_{01}) - \sigma_{01}(1+\pi_{12})}{\sigma_{01}} \quad (\text{E58})$$

Le développement en  $\epsilon$  de  $|\sigma|^2$  donne :

$$|\sigma|^2 = \sigma_{01}^2 \left( \frac{A + 4B\epsilon^2}{C + 4D\epsilon^2} \right) \quad (\text{E59})$$

**expression dans laquelle:**

$$5 \qquad \qquad A = \Delta^2 \qquad \qquad (E60)$$

$$B = (1 - \pi_{12})^2 + \Delta(1 + \pi_{12}) \quad C = (1 - P + \pi_{01}\pi_{12}) \quad D = P + P\pi_{01}\pi_{12} - 4\pi_{01}\pi_{12}$$

et où :

$$P = r_{01(n)}r_{12(n)} + r_{01(s)}r_{12(s)} \quad (\text{E61})$$

## 10 Il s'ensuit:

$$\frac{d}{d\varepsilon} \ln |\sigma^2| = \frac{8B\varepsilon}{A+B\varepsilon^2} - \frac{8D\varepsilon}{C+D\varepsilon^2} \quad (\text{E61})$$

L'équation E57 a pour solution:

$$4\varepsilon^2 = \frac{AC}{BC+AD} \quad (\text{E62})$$

Si le revêtement reste performant,  $\Delta$  est petit, et dans ce cas  $\epsilon$  est proche de  $\frac{\Delta}{2}$ .

La relation de définition E18 nous donne finalement les deux épaisseurs  $e_1'$  et  $e_1''$  qui optimisent le contraste:

$$\mathbf{e}_1' = \frac{\lambda}{4} \left( 1 + \frac{2\varepsilon}{\pi} \right) + k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{E63})$$

$$\mathbf{e}_1'' = \frac{\lambda}{4} \left( 1 - \frac{2\varepsilon}{\pi} \right) + k \frac{\lambda}{2}$$

Les formules E63 généralisent la formule E24 aux supports amplificateurs de contraste non idéaux.

Nous désignons la famille des supports amplificateurs de contraste par l'appellation supports Ampli-Pol lorsqu'il y a lieu de les distinguer des supports AR-Pol. Entre polariseurs croisés, ils deviennent les supports Ampli-X-Pol, etc..

## IX. Supports AR-X-Pol et Ampli-X-Pol anisotropes

Dans toute utilisation d'un support AR-Pol ou d'un support Ampli-Pol, il est essentiel d'optimiser ses performances (taux d'extinction utile  $C_u$  ou contraste  $C_f$ ). Pour cela, il faut satisfaire aux relations qui le définissent avec précision, ce qui engendre des difficultés de fabrication (tolérance sévère sur l'épaisseur  $e$  par exemple) et des difficultés de mise en oeuvre (réglage des paramètres du microscope pour une visualisation par exemple).

Afin de diminuer ces difficultés, il est avantageux d'introduire dans les supports un élément de réglage. Cet élément est apporté par l'utilisation de matériaux aux propriétés optiques anisotropes dans la réalisation des supports.

Par défaut, le matériau anisotrope est le substrat 1, la couche 2 et le milieu incident restant isotropes. Les axes principaux ( $x$ ,  $y$ , et  $z$ ) du matériau anisotrope sont parallèles et perpendiculaire à la surface du support. Les coefficients de Fresnel du support sont remplacés par une matrice de réflexion:

$$\begin{pmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{pmatrix} \quad (\text{E70})$$

dans laquelle compte tenu des orientations des axes principaux  $r_{ps} = r_{sp} = 0$ , ce qui permet d'exprimer l'amplitude réfléchie en fonction de l'amplitude incidente comme:

$$\begin{pmatrix} E_{r_p} \\ E_{r_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{px} & 0 \\ 0 & r_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} \quad (\text{E71})$$

quand l'axe  $x$  est dans le plan d'incidence, et comme:

$$\begin{pmatrix} E_{r_p} \\ E_{r_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{py} & 0 \\ 0 & r_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{pmatrix} \quad (\text{E71})$$

quand l'axe  $y$  est dans le plan d'incidence. A l'interface entre le milieu isotrope  $i$  et le milieu anisotrope  $j$ , les coefficients  $r_{ij(px)}$ ,  $r_{ij(sx)}$ ,  $r_{ij(py)}$  et  $r_{ij(sy)}$  sont donnés par

$$r_{ij(px)} = \frac{n_{jx}n_{jz}c_i - n_i(n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_{jx}n_{jz}c_i + n_i(n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{E72})$$

$$r_{ij(xx)} = \frac{n_i c_i - (n_{jx}^2 - n_i^2 s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_i c_i + (n_{jx}^2 - n_i^2 s_i^2)^{\frac{1}{2}}}$$

si le plan d'incidence est parallèle à x, et:

$$5 \quad r_{ij(py)} = \frac{n_{jy}n_{jz}c_i - n_i(n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_{jy}n_{jz}c_i + n_i(n_{jx}^2 - n_i^2s_i^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{E73})$$

$$r_{ij(sy)} = \frac{n_i c_i - (n_{jx}^2 - n_i^2 s_i^2)^{\frac{1}{2}}}{n_i c_i + (n_{jx}^2 - n_i^2 s_i^2)^{\frac{1}{2}}}$$

La formule E17 restant toujours valide pour  $r(mx)$  et  $r(my)$  à la fois (avec  $m = p$  ou  $m = s$ ) s'il est parallèle à y.

Les équations E72 montrent que, selon l'orientation relative  $\phi = (P,x)$  de 10 l'échantillon et du polariseur  $P$  en azimut, obtenue en effectuant une rotation de l'un par rapport à l'autre autour de la normale, on obtient des coefficients de Fresnel effectifs  $r_{ij(p)}$  et  $r_{ij(s)}$  variables, donnés par les combinaisons linéaires suivantes:

$$15 \quad r_{ij(p)} = r_{ij(px)} \cos \varphi + r_{ij(py)} \sin \varphi \quad (\text{E74})$$

$$r_{ij(s)} = r_{ij(xx)} \cos \varphi + r_{ij(sy)} \sin \varphi$$

Un raisonnement analogue s'applique au cas où le substrat 1 est isotrope et la couche 2 anisotrope.

Ainsi, un support optimal pour une visualisation sous microscope en 20 lumière polarisée est anisotrope et tel que tel que la valeur optimale de ses coefficients de réflexion  $r_p$  et  $r_s$  soit obtenue pour un angle  $\phi$  intermédiaire entre 0 et  $\frac{\pi}{2}$  et de préférence égal à  $\frac{\pi}{4}$  pour donner la latitude de réglage maximale.

#### X . Polarisation circulaire

25 L'invention ne saurait être limitée à la description qui précède. Le faisceau lumineux utilisé a ainsi dans un autre mode de réalisation une

polarisation circulaire et les supports AR-Pol et Ampli-Pol présentent avantageusement une même efficacité. Comme il est bien connu, les observations et mesures entre polariseur et analyseur croisés sont alors remplacées par des observations et mesures équivalentes entre [polariseur 5 suivi d'une lame  $\frac{1}{4}$  d'onde] et [lame  $\frac{1}{4}$  d'onde identique suivie d'un polariseur (ou analyseur) parallèle au premier, préférentiellement identique]. Ceci vaut aussi pour toutes les techniques de visualisation et de mesure en contraste interférentiel différentiel (DIC).

10 Le support de l'invention a fait l'objet de plusieurs mises en œuvre présentées dans les exemples suivants pour lesquels la longueur d'onde arbitraire d'éclairage est, sauf spécification contraire,  $\lambda = 540$  nm.

On a constaté que lorsqu'un support conforme à l'invention a été déterminé, il est possible d'en déduire d'autres qui, du point de vue de 15 l'invention, ont des propriétés comparables en modifiant l'épaisseur  $e_1$  de la couche 2 et la longueur  $\lambda$  d'utilisation tout en maintenant leur rapport  $\frac{e_1}{\lambda}$  constant. Cela ouvre de très larges possibilités.

#### Exemple 1

20

Les supports AR-Pol, bien qu'obéissant à des règles de construction très pointues, se déclinent à l'infini. Quatre exemples (indice  $n_1$  et épaisseur de couche  $e_1(\text{\AA})$ ) de supports AR-Pol-1 idéaux pour une incidence proche de la normale ( $\theta_0=5^\circ$ ) sont présentés ci dessous. Ces exemples sont destinés à être utilisés comme supports porte-objet pour des observations et des mesures effectuées dans un milieu ambiant tel que l'air (le milieu incident 25 étant l'air ou le substrat).

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
or	$0.40 - 2.6j$	1.70	694
argent	$0.13 - 3.44j$	1.59	795
aluminium	$0.92 - 0.95j$	2.01	346
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.51	847

Nous donnons aussi pour ces substrats 1 les indices  $n_1$  et les épaisseurs  $e_1$  des revêtements à une couche 2 qui optimisent le contraste  $C_f$  de toute observation entre polariseurs croisés avec un éclairage axial convergent sous une incidence de  $0,2^\circ$  (par convention  $\theta_0 = 0$ ) et nous 5 donnons la valeur  $n_1$  et la valeur absolue du contraste  $C_f$  obtenu avec un éclairage convergent d'ouverture  $30^\circ$  au bord d'un film de 1 nanomètre d'épaisseur ainsi que les épaisseurs  $e_1'$  et  $e_1''$  telles que définies par les équations 63.

10 L'indice  $n_2$  est l'indice du matériau constitutif du support. Il est extrait de « Hand Book of Optics, Mc Graw Hill Professional Publishing New York 2000 » dans lequel une longueur d'onde particulière est définie pour chaque matériau.

15

		$\theta_0=0$	$\theta_0=0$		$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	
substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$	$C_f$	$n_1$	$e_1'(\text{\AA})$	$e_1''(\text{\AA})$	$C_f$
Or	$0.47 - 2.83j$	1.65	800	1	1.58	870	880	0.17
Argent	$0.2 - 3.44j$	1.60	850	1	1.53	930	940	0.17
aluminium	$1.44 + 5.23j$	1.50	953	1	1.44	1 040	1 050	0.07
Nickel	$1.58 - 3.42j$	1.52	920	1	1.46	1 000	1 010	0.06

Par ailleurs, nous donnons aussi, pour ces substrats 1, les indices  $n_1$ , épaisseurs  $e_1$  des revêtements à une couche 2 qui optimise le contraste  $C_f$  de 20 toute observation entre polariseurs croisés avec un éclairage annulaire sous une incidence de  $20^\circ$ . Nous donnons la valeur absolue du contraste  $C_f$  obtenu dans ces conditions, avec un éclairage convergent d'ouverture  $30^\circ$  ( $\pi/6$ ) au bord d'un film de 1 nanomètre d'épaisseur. Les épaisseurs  $e_1'$  et  $e_1''$  sont celles données par les équations E63.

25

		$\theta_0=20^\circ$	$\theta_0=20^\circ$		$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	$0 < \theta_0 < \frac{\pi}{6}$	
substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$	$C_f$	$n_1$	$e_1'(\text{\AA})$	$e_1''(\text{\AA})$	$C_f$
Or	$0.40 - 2.6j$	1.64	739	1	1.64	730	740	0.65

Argent	$0.13 - 3.44j$	1.55	838	1	1.55	832	842	0.85
aluminium	$0.92 - 0.95j$	1.89	399	1	1.89	395	415	0.25
Nickel	$1.76 - 3.2j$	1.48	890	1	1.48	880	905	0.50

Les indices  $n_1$  sont très courants et les couches 2 peuvent être réalisées par toutes les techniques de dépôt classiques, par exemple dépôts d'oxydes réalisés par PECVD (Phase evaporation chemical vapor deposition).

5

### Exemple 2

Des exemples (indice  $n_1$ ) de supports AR-Pol-1 sont présentés ci-dessous pour un substrat 1 de silicium et pour des utilisations soit dans un milieu ambiant tel que l'air, soit en immersion.

Des supports AR-Pol idéaux anisotropes peuvent être obtenus en déposant sur un substrat 1 de silicium ( $n_2 = 4.12 - 0.05j$ ) dopé ou non, clivé selon un plan 100 une couche 2 d'épaisseur optique  $\frac{\lambda}{4}$  au sens de la relation

E24 et d'indice  $n_1$ , égal à:

- 15 1.37 quand le milieu incident est l'air (d'indice 1)
- 1.79 quand le milieu incident est l'eau (d'indice 1.33)
- 1.99 quand le milieu incident est une huile d'indice 1.5.

Les couches 2 ont alors des indices moins courants qui s'obtiennent préférentiellement:

- 20 - soit par des procédés sol-gel et aérogels conduisant à des silices poreuses (indice 1.37), l'indice étant également bien approché par une couche de  $MgF_2$  (indice 1.38).
- soit par des techniques d'oxydation avec des mélanges de gaz conduisant à des mélanges de matériaux  $SiO_2 - SiO$  (indice 1.79), ou à
- 25 des couches d'oxynitrides  $SiO_xN_y$  (indices 1.79 et 1.99) avec les proportions suivantes:  $x= 0.4$  et  $y= 0.6$  pour obtenir  $n_1 = 1.79$ ;  $x=0$  et  $y= 1$  pour obtenir  $n_1 = 1.99$ .

L'indice  $n_1 = 1.37$  peut aussi s'obtenir par dépôt de polymères fluorés (tels que des trifluoroalkyl-alkylsiloxanes ou des copolymères de trifluoroalkyl-alkylsiloxanes et de dimethylsiloxanes), le dépôt pouvant s'effectuer par spin-coating à partir d'une solution.

Les indices 1.79 et 1.99 peuvent aussi s'obtenir par toutes les techniques de dépôt, en particulier par dépôt PECVD de mélanges d'oxydes tels que  $HfO_2$  et  $Y_2O_3$  ou de tous les matériaux listés dans les dictionnaires de propriétés physiques des matériaux (par exemple: Handbook of Optical constants of solids, Vol. 1-5, Academic Press, Ed. Palik and Ghosh (1997)) ou dans les dictionnaires d'optique (par exemple: Handbook of optics, McGraw-Hill Professional Publishing, New-York, (2000)).

L'indice de certains matériaux change fortement avec la longueur d'onde de la lumière, et l'ajustement d'indice peut être remplacé par un ajustement de longueur d'onde; C'est par exemple le cas d'une couche 2 de  $SiO$  qui présente un indice utile de 1.95 pour  $\lambda = 490$  nm et de 1.99 pour  $\lambda = 540$  nm.

### Exemple 3

15 Nous donnons ci-dessous quelques autres exemples de supports AR-Pol idéaux (qui sont donc aussi Ampli-Pol idéaux) pour différents milieux incidents et pour un éclairage annulaire de très faible incidence ( $\theta_0 = 5$  degrés). L'épaisseur  $e_1$  est en Angströms.

20 Un premier tableau est donné pour un angle d'incidence de 0,2°. L'indice  $n_2$  est l'indice du matériau constitutif du support. Il est extrait de « Hand Book of Optics, Mc Graw Hill Professional Publishing New York 2000 dans lequel une longueur d'onde particulière est définie pour chaque matériau.

25

substrat	$n_2$	$n_0$	$n_1$	$e_1$
or	0.47-2.83j	1.33	2.42	490
or	1.5		2.95	368
argent	2.0-3.44j	1.33	2.35	526
argent		1.5	2.8	417
aluminium	1.44+5.23j	1.33	2.05	684
aluminium		1.5	2.33	587
nickel	1.58-3.42j	1.33	2.13	620
nickel		1.5	2.5	505
cadmium	1.13-5.01j	1	1.47	968

cadmium		1.33	2.08	667
cadmium		1.5	2.38	575
étain	1.43-5.25j	1	1.48	975
étain	1.48-5.25j	1	1.48	975
		1.33	2.03	693
		1.5	2.34	600
cuivre	0.52-2.57j	1	1.68	768
cuivre		1.33	2.52	448
cuivre		1.5	3.05	338
Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1	1.545	802
		1.33	2.24	459
		1.5	2.72	332

Un deuxième tableau est donné pour un angle d'incidence de 5°.

La longueur d'onde est  $\lambda = 540 \text{ nm}$  excepté pour le Cadmium où elle vaut 589,3 nm.

5

substrat	$n_2$	$n_0$	$n_1$	$e_1$
or	0.40 - 2.6j	1.33	2.42	490
or	0.40 - 2.6j	1.5	1.79	755
argent	0.13 - 3.44j	1.33	2.28	512
argent	0.13 - 3.44j	1.5	2.7	412
aluminium	0.92 - 0.95j	1	1.89	399
nickel	1.76 - 3.2j	1.33	2.11	572
nickel	1.76 - 3.2j	1.5	2.45	473
cadmium	1.13-5.01j	1	1.49	970
cadmium	1.13-5.01j	1.33	2.05	684
cadmium	1.13-5.01j	1.5	2.36	582
étain	1.48-5.25j	1	1.48	899
étain	1.48-5.25j	1.33	2.02	640
étain	1.48-5.25j	1.5	2.33	548
cuivre	1.04-2.59j	1	1.62	746
cuivre	1.04-2.59j	1.33	2.23	423
cuivre	1.04-2.59j	1.5	2.83	351

Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1	1.54	737
Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1.33	2.23	423
Fer (évaporé)	1.51-1.63j	1.5	2.72	305

Exemple 4

Nous donnons enfin un exemple avec un éclairage annulaire à une longueur d'onde  $\lambda = 589,3$  nm et un angle d'incidence important. Pour un support de cadmium et une observation dans un milieu ambiant tel que l'air sous un angle d'incidence unique de 30 degrés, la couche 2 idéale est obtenue pour  $n_1 = 1.42$  et  $e_1 = 1084$  Angströms.

Les valeurs des indices sont tirées du livre de Born and Wolf, intitulé "Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and diffraction of Light", Cambridge University Press (1999) et du livre de E.D. Palik, intitulé « handbook of optical constants of solids », vol. 1 à 5, Academic Press (1985).

Applications possibles dans les industries de l'optique, dans l'amélioration des mesures ou l'observation en réflexion de films minces ou d'objets très petits sous microscope optique ou sous tout autre instrument d'imagerie optique tel que viseur, lunette, microscope, loupe, loupe binoculaire, caméra, appareil photo, microscope à champ proche, endoscope, microscope confocal, microscope à champ proche optique (SNOM), lecteur de biopuces, lecteur magnéto-optique, microscope confocal.

Les supports AR-X-Pol et Ampli-Pol sont utilisables à la fois comme fond anti-réfléchissant et comme support porte objet pour tous les travaux de microscopie en lumière polarisée en réflexion, que l'observation se fasse à l'air libre, en immersion, ou à travers le support.

Ils permettent une visualisation optimale non seulement d'objets posés à la surface du support, mais aussi de l'interface entre le substrat 1 et la couche 2.

Ils permettent une visualisation et une mesure optimales de tous les effets de dichroïsme et de biréfringence à l'intérieur de la couche 2 elle-même.

Cela est particulièrement avantageux pour l'imagerie et la lecture parallèle de domaines magnétiques situés dans la couche lorsqu'elle possède une

susceptibilité magnéto-optique à chacun des effets suivants: effet Faraday, effet Voigt, biréfringence magnétique linéaire.

Ils permettent une visualisation et une mesure optimales de tous les effets d'anisotropie de réflexion à l'interface entre le substrat 1 et la couche 2,

5 ce qui est particulièrement avantageux pour la mise en oeuvre de la technique de microscopie de réflexion anisotrope (RAM).

Cela est aussi particulièrement avantageux si le substrat 1 présente une susceptibilité magnéto-optique (effet Kerr longitudinal ou transverse, effet Kerr polaire), les revêtements AR-Pol apportant une amélioration considérable en 10 contraste et en sensibilité des procédés de lecture magnéto-optiques.

Les supports AR-Pol sont particulièrement efficaces pour les observations en contraste interférentiel différentiel en réflexion, quel que soit la variante de la technique utilisée, et quel que soit le type de polarisation utilisé (linéaire ou circulaire) et permettent la combinaison de toutes ces 15 techniques de contraste interférentiel avec toutes les autres techniques de visualisation, de détection, ou de mesure mentionnées.

Les revêtements AR-Pol à une couche 2 existent pour tous les types de substrats 1. Ils permettent une détection plus sensible qu'avec toutes les autres techniques des modifications qui se produisent à l'extrémité d'une fibre 20 optique, et notamment la détection d'une espèce capturée par une couche 2 sensible installée à l'extrémité d'une telle fibre.

Ce sont des supports porte-objet idéaux pour les techniques de microscopie à champ proche (AFM, STM, SNOM, et autres SPM) car ils permettent la détection, le repérage, et la visualisation de films ou objets 25 invisibles par les techniques optiques conventionnelles.

Ce sont aussi des supports idéaux pour effectuer le suivi optique *in situ* ou le contrôle de la qualité *a posteriori* de dépôts de couches 2 ultra-minces effectués par toutes les techniques de dépôt disponibles, par exemple par les techniques de Langmuir-Blodgett, par les techniques de plasmas, de dépôt 30 ionique, de spin-coating, de dip-coating, par MBE, etc...

Utilisés comme supports porte-objets, ils augmentent aussi l'efficacité des techniques des techniques magnéto-optiques, des techniques de microscopie confocale en lumière polarisée, des techniques SNOM (Scanning Near-field Optical Microscopy) en lumière polarisée, et de toutes les

techniques de visualisation spectroscopiques (absorption infra-rouge, Raman, Fluorescence, Absorption ultra-violette, Microscopie à 2 photons).

Utilisés comme supports porte-objets, ils permettent d'accroître considérablement la qualité des mesures de réflectivité en lumière polarisée et d'ellipsométrie sous microscope optique.

Les supports AR-Pol sont aussi avantageusement utilisés comme supports porte-objet dans tous les dispositifs de micro-manipulation sous microscope optique: pinces optiques, pinces magnétiques, pinces piézo-électriques.

REVENDICATIONS

1. Support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé sur le support ou à son voisinage dans un milieu (3) d'indice  $n_0$  avec un éclairage spatialement incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$  caractérisé en ce que,

10 la valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) est à 2% près telle que :

$$\frac{d^2}{de_1^2} \ln|\sigma|^2 = 0$$

avec

$$\sigma = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})}$$

15

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)] :

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

20 et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ ,

$$\text{avec } \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}.$$

25

2. Support destiné à l'observation entre polariseurs croisés d'un objet placé sur le support ou à son voisinage dans un milieu (3) d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$

caractérisé en ce que,

5

la valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) est à 2% près telle que :

$$\frac{d}{de_1} |\sigma^2| = 0$$

avec

$$10 \quad \sigma = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)}e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)}r_{12(s)}e^{(-2j\beta_1)})}$$

formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)]:

$$15 \quad r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ , avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

20

3. Support destiné à l'optimisation du coefficient d'extinction utile d'un microscope polarisant pour l'observation d'un objet placé sur le support ou au-dessus du support dans un milieu (3) d'indice  $n_0$  avec un éclairage incohérent convergent incident sous un angle  $\theta_0$  à une longueur d'onde  $\lambda$ , comportant

- 25 - un substrat (1) d'indice de réfraction complexe  $n_2$ ,
- une couche (2) d'indice de réfraction complexe  $n_1$  et d'épaisseur  $e_1$

caractérisé en ce que,

30 la valeur de l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) est à 2% près telle que :

$$\frac{d}{de_1} \left( \frac{|\sigma|^2}{R_{NP}} \right) = 0$$

avec

$$R_{NP} = \frac{1}{4} |r_p + r_s|^2 + \frac{1}{4} |r_p - r_s|^2$$

5 et

$$r_p = \frac{r_{01(p)} + r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)}}{1 + r_{01(p)} r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)}} \quad \text{et} \quad r_s = \frac{r_{01(s)} + r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)}}{1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)}}$$

et

$$\sigma = r_p + r_s = \frac{\sigma_{01} + \sigma_{12}(1 + \pi_{01})e^{(-2j\beta_1)} + \sigma_{01}\pi_{12}e^{(-4j\beta_1)}}{(1 + r_{01(p)} + r_{12(p)} e^{(-2j\beta_1)})(1 + r_{01(s)} r_{12(s)} e^{(-2j\beta_1)})}$$

10 formule dans laquelle  $\sigma_{ij}$  et  $\pi_{ij}$  représentent respectivement la somme et le produit des coefficients de Fresnel des différents interfaces [(i,j)=(0,1) ou (1,2)]:

$$r_{ij(p)} = \frac{n_j \cos \theta_i - n_i \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_i + n_i \cos \theta_j}$$

et

$$15 \quad r_{ij(s)} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j}$$

et dans laquelle  $\beta_1 = \frac{2\pi n_1 e_1 \cos \theta_1}{\lambda}$ , avec  $\cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$ .

20 4. Support selon la revendication 1 ou 2 ou 3, caractérisé en ce que les valeurs de l'indice de réfraction  $n_1$  et de l'épaisseur  $e_1$  de la couche (2) sont à 2% près tels que :

$$\sigma = 0$$

25 5. Support selon la revendication 4, caractérisé en ce que le substrat (1) et la couche (2) sont diélectriques ou faiblement absorbants, le module de la partie imaginaire de leur indice complexe étant inférieur à 0.01, les conditions générales de la revendication 4 se réduisant aux conditions:

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

et

$$n_1^2 = \frac{n_2^2 + \sqrt{n_2^2 \cos^2 \theta_0 (n_2^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0)}}{n_2^2 + n_0^2 \cos^2 \theta_0}$$

avec  $k$  entier et avec une incertitude de 2 % sur les valeurs de  $n_1$  et  $e_1$

5

6. Support selon la revendication 5, caractérisé en ce que  $\theta_0$  est inférieur à 5°, les conditions générales de la revendication 4 se réduisant à

$$\frac{2}{n_1^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_2^2}$$

10 et

$$n_1 e_1 \cos \theta_1 = \frac{\lambda}{4} + k \frac{\lambda}{2}$$

avec  $k$  entier et avec une incertitude de 2 % sur les valeurs de  $n_1$  et  $e_1$ .

15 7. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 ou 5 à 6, caractérisé en ce qu'il est destiné à un usage en éclairage incident annulaire avec un angle d'incidence  $\theta_0$  qui est unique à ± 2.5° près.

20 8. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 ou 5 à 6, caractérisé en ce qu'il est destiné à un usage en éclairage incident et axial convergent avec un angle d'incidence moyen  $\theta_0$  lié à son ouverture angulaire totale  $\Delta\theta_0$  par la relation :

$$\cos \theta_0 = \cos^2 \left( \frac{\Delta\theta_0}{2} \right)$$

25 9. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que l'éclairage est monochromatique ou quasi-monochromatique à la longueur d'onde  $\lambda$ .

30 10. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que l'éclairage est à spectre large continu ou polychromatique d'étendue maximale ± 0.3  $\lambda$  autour de sa longueur d'onde moyenne  $\lambda$ .

11. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et 7 à 10, destiné à un usage dans l'air comme milieu ambiant (3), avec  $\theta_0 = 30^\circ$  et  $\lambda = 589,3$  nm, caractérisé en ce que le substrat (1) est en cadmium avec  $n_2 = 1.13 - 5.01j$ , la couche (2) ayant pour indice  $n_1 = 1.42$  et  
5  $e_1 = 1084$  Angströms.

12. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et 7 à 10, caractérisé en ce que le substrat (1) et la (2) ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche,  $n_2$  l'indice  
10 de réfraction complexe du substrat (1), pour l'air comme milieu ambiant (3),  $\theta_0 = 5^\circ$  et  $\lambda = 540$  nm

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
or	$0.40 - 2.6j$	1.70	694
argent	$0.13 - 3.44j$	1.59	795
aluminium	$0.92 - 0.95j$	2.01	346
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.51	847

13. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et 7 à 10, caractérisé en ce que  $\theta_0$  est un angle d'incidence moyen valant  $20^\circ$  et en ce que le substrat (1) et la couche (2) ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche (2),  $n_2$  l'indice de  
15 réfraction complexe du substrat (1), pour l'air comme milieu ambiant (3) et  $\lambda = 540$  nm.

substrat	$n_2$	$n_1$	$e_1(\text{\AA})$
Or	$0.40 - 2.6j$	1.64	739
Argent	$0.13 - 3.44j$	1.55	838
aluminium	$0.92 - 0.95j$	1.89	399
Nickel	$1.76 - 3.2j$	1.48	890

20

14. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 et 7 à 10, caractérisé en ce que  $\theta_0$  vaut  $5^\circ$  et en ce que le substrat (1) et la couche (2) ont les spécificités du tableau suivant dans lequel  $n_1$  et  $e_1$  sont l'indice et l'épaisseur de la couche (2) à 2% près,  $n_2$  l'indice de réfraction complexe du

substrat (1),  $n_0$  l'indice du milieu ambiant (3) ,  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$  quand la couche (2) est en cadmium et  $\lambda = 540 \text{ nm}$  dans les autres cas.

substrat	$n_2$	$n_0$	$n_1$	$e_1$
or	$0.40 - 2.6j$	1.33	2.42	490
or	$0.40 - 2.6j$	1.5	1.79	755
argent	$0.13 - 3.44j$	1.33	2.28	512
argent	$0.13 - 3.44j$	1.5	2.7	412
aluminium	$0.92 - 0.95j$	1	1.89	399
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.33	2.11	572
nickel	$1.76 - 3.2j$	1.5	2.45	473
cadmium	$1.13-5.01j$	1	1.49	970
cadmium	$1.13-5.01j$	1.33	2.05	684
cadmium	$1.13-5.01j$	1.5	2.36	582
étain	$1.48-5.25j$	1	1.48	899
étain	$1.48-5.25j$	1.33	2.02	640
étain	$1.48-5.25j$	1.5	2.33	548
cuivre	$1.04-2.59j$	1	1.62	746
cuivre	$1.04-2.59j$	1.33	2.23	423
cuivre	$1.04-2.59j$	1.5	2.83	351
Fer (évaporé)	$1.51-1.63j$	1	1.54	737
	$1.51-1.63j$	1.33	2.23	423
	$1.51-1.63j$	1.5	2.72	305

5 15. Support selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que les paramètres définis par les revendications 11 à 14 sont conservés à l'exception de la longueur d'onde  $\lambda$  et de l'épaisseur  $e_1$  de la couche 2 qui sont modifiés proportionnellement,  $\frac{e_1}{\lambda}$  n'étant pas modifié.

10 16. Accessoire destiné à l'observation d'un échantillon préférentiellement liquide constitué d'une boîte de Petri et d'un support destiné à recevoir ledit échantillon, caractérisé en ce que :

- le support est conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 15,
- le support est le fond de cette boîte.

17. Dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un support destiné à recevoir ledit échantillon et deux polariseurs croisés, caractérisé en ce que le support est conforme à l'une quelconque des 5 revendications 1 à 15.

18. Dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un accessoire destiné à recevoir ledit échantillon et deux polariseurs croisés, caractérisé en ce que l'accessoire est conforme à la revendication 16. 10

19. Dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un support destiné à recevoir ledit échantillon, un polariseur et une lame quart-d'onde, caractérisé en ce que le support est conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 15. 15

20. Dispositif d'observation d'un échantillon comprenant un microscope optique, un accessoire destiné à recevoir ledit échantillon, un polariseur et une lame quart-d'onde, caractérisé en ce que l'accessoire est conforme à la revendication 16. 20

21. Dispositif d'observation d'un échantillon selon la revendication 16 ou 17 ou 18, caractérisé en ce que le microscope optique est muni d'un dispositif de contraste interférentiel différentiel. 25

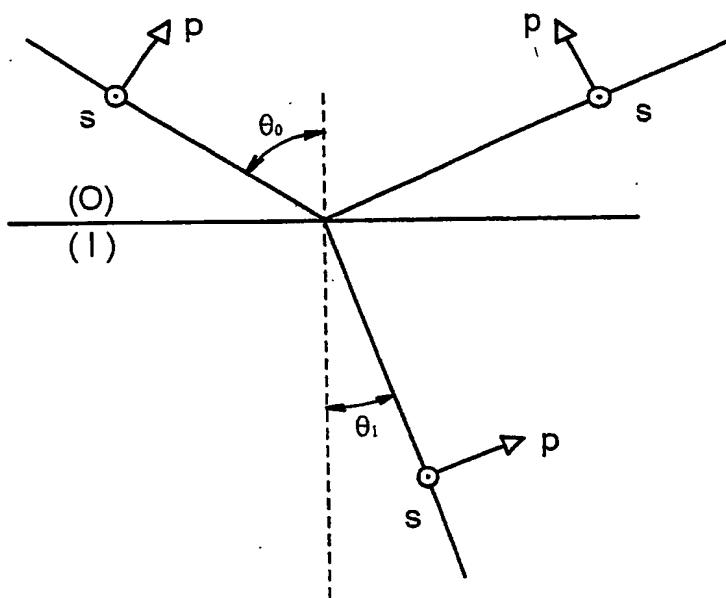


FIGURE 1

10/518075

WO 2004/001399

PCT/EP2003/001895

2/2

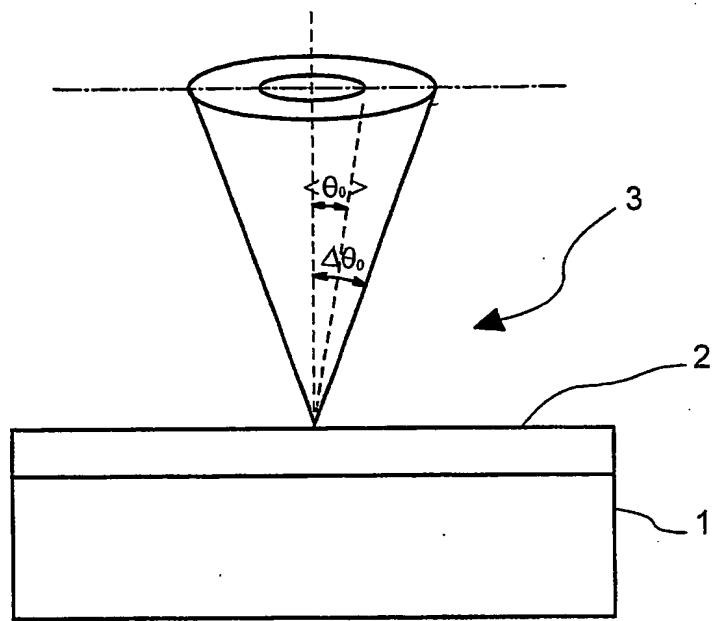


FIGURE 2

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 03/01895

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
 IPC 7 G01N21/21 G01J4/00 G01B11/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 IPC 7 G01N G01J G01B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	GB 2 352 030 A (IBM) 17 January 2001 (2001-01-17) page 3, line 41 -page 4, line 19 page 8, line 27-42 ---	1-3
A	US 5 333 052 A (FINAROV MOSHE) 26 July 1994 (1994-07-26) column 2, line 13-68 column 4, line 1-5 column 4, line 42 -column 8, line 6 column 11, line 53-68 ---	1-3
A	GB 2 291 890 A (ANELVA CORP ;NIPPON ELECTRIC CO (JP)) 7 February 1996 (1996-02-07) abstract column 13, line 9-14 ----	1-3 -/-

 Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

5 November 2003

Date of mailing of the international search report

13/11/2003

## Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Verdrager, V

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 03/01895

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>DICKE J ET AL: "Ellipsomicroscopy for surface imaging: contrast mechanism, enhancement, and application to CO oxidation on Pt(110)"  JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - A, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 17, no. 1, January 2000 (2000-01), pages 135-141, XP002182387  ISSN: 1084-7529  page 137, paragraph 1  -----</p>	1-3
A	<p>DE 197 08 036 A (ELENDER GUNTHER DR ;MERKEL RUDOLF DR (DE); NEUMAIER KLAUS DIPL PHY) 10 September 1998 (1998-09-10)  column 2, line 60 -column 3, line 6  column 5, line 12-22  column 6, line 21-54  -----</p>	1-3
A	<p>SHATALIN S V ET AL: "Polarisation contrast imaging of thin films in scanning microscopy"  OPTICS COMMUNICATIONS, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO. AMSTERDAM, NL, vol. 116, no. 4, 1 May 1995 (1995-05-01), pages 291-299, XP004011523  ISSN: 0030-4018  page 292, column 2, paragraph 3  page 294, column 1, paragraph 2  -----</p>	1-4,8
A	<p>US 5 408 322 A (HSU JON S ET AL)  18 April 1995 (1995-04-18)  column 9, line 40-45  column 11, line 28-31  -----</p>	1-3

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Search Report No

PCT/FR 03/01895

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
GB 2352030	A	17-01-2001	US	6453263 B1	17-09-2002
US 5333052	A	26-07-1994	IL EP JP JP WO	96483 A 0563221 A1 2702281 B2 6504843 T 9209880 A2	31-07-1995 06-10-1993 21-01-1998 02-06-1994 11-06-1992
GB 2291890	A	07-02-1996	JP JP KR US	2648098 B2 8045851 A 152369 B1 5793479 A	27-08-1997 16-02-1996 01-12-1998 11-08-1998
DE 19708036	A	10-09-1998	DE	19708036 A1	10-09-1998
US 5408322	A	18-04-1995	AU CA DE DE EP JP JP WO	6266794 A 2159831 A1 69423212 D1 69423212 T2 0696345 A1 2969950 B2 8509810 T 9425823 A1	21-11-1994 10-11-1994 06-04-2000 07-09-2000 14-02-1996 02-11-1999 15-10-1996 10-11-1994